

工业锅炉热力计算

B. И. 恰斯多罕恩 主编

张昌煜 陈蕙芝 译

第一机械工业部上海工业锅炉研究研

一 九 八 一 年

工业锅炉热力计算

B. M. 恰斯多尔恩 主编

张昌煜 陈惠芝 译

第一机械工业部上海工业锅炉研究所

一 九 八 一 年

工业锅炉热力计算

B. H. 恰斯多罕恩 主编

张昌煜、陈蕙芝 译

本书叙述工业锅炉热力计算方法，介绍各节点和另部件方面的布置及结构设计。书中编有蒸汽锅炉热力计算实例。书末参考资料中编入中小容量锅炉、燃烧设备、省煤器和空气预热器的主要技术特性。书中考虑了苏联新订国家标准对炉膛和锅炉的若干要求。

本书可作为高等工业学校《工业热力学》专业的学生教学参考书，也可供从事工业锅炉运行和改造工作的工程技术人员使用。

目 录

第一章 设计任务和热力计算原始数据选择	(1)
第1—1节 热力计算方法及其一般规定	(1)
第1—2节 计算的任务	(2)
第1—3节 炉膛型式选择	(2)
第1—4节 尾部受热面的预选, 排烟温度和空气温度	(4)
第1—5节 绘制锅炉方案图	(6)
第二章 燃料、空气和燃烧产物	(7)
第2—1节 按任务指定的 W^P 和 A^P 值来换算燃料成分及其发热值	(7)
第2—2节 过量空气系数和锅炉烟道内诸漏风系数的选择	(8)
第2—3节 空气和燃料燃烧产物的容积计算	(8)
第2—4节 空气和燃烧产物的焓	(10)
第三章 锅炉的热平衡	(13)
第3—1节 燃料的支配热	(13)
第3—2节 热平衡的有关项目	(13)
第3—3节 保热系数	(15)
第3—4节 燃料消耗量	(15)
第四章 炉膛的主要结构尺寸	(15)
第4—1节 初拟的炉膛计算方案图	(15)
第4—2节 炉膛尺寸计算	(17)
第五章 炉内换热计算	(22)
第5—1节 计算方法和基本的计算关系式	(22)
第5—2节 校核计算	(23)
第5—3节 设计校核计算	(35)
第六章 对流受热面计算	(36)
第6—1节 基本的计算关系式	(36)
第6—2节 传热系数确定	(37)
第6—3节 温压的确定	(48)
第七章 凝渣管和蒸发管束计算	(51)
第八章 过热器计算	(53)
第8—1节 绘制计算方案图	(54)
第8—2节 主要方程式和基本的计算关系式	(55)
第8—3节 过热器(或其中一级)的校核计算	(57)
第8—4节 过热器(或其中一级)的设计计算	(58)

第九章 尾部受热面计算.....	(59)
第9—1节 计算方案图和计算特点.....	(59)
第9—2节 主要方程式和基本的计算关系式.....	(61)
第9—3节 校核计算.....	(63)
第9—4节 设计计算.....	(63)
第9—5节 锅炉热力计算汇总表和热平衡的计算误差.....	(66)
第十章 设计的制图部分.....	(67)
第10—1节 制图范围和制图的一般规定.....	(67)
第10—2节 锅炉的若干节点和另部件的结构设计.....	(68)
第十一章 锅炉的成本.....	(82)
附录 I 锅炉热力计算示例.....	(88)
第 I—1 节 $T\Pi-35y$ 型锅炉的热力计算	(88)
第 I—2 节 燃用重油的 $\Pi KBP-10-23$ 型锅炉的炉膛计算	(115)
附录 II 中小容量锅炉的技术特性.....	(118)
附录 III 层燃炉和室烧炉的结构组成.....	(161)
第 III—1 节 层燃炉的规格及其布置.....	(161)
第 III—2 节 煤粉燃烧器和煤气—重油燃烧器的规格及室烧炉布置.....	(165)
附录 IV 省煤器和空气预热器的布置及其结构特性.....	(173)
第 IV—1 节 钢制空气预热器的结构性能.....	(173)
第 IV—2 节 玻璃管空气预热器的结构特性.....	(174)
第 IV—3 节 省煤器结构特性.....	(177)
第 IV—4 节 省煤器和空气预热器的规格.....	(178)
附录 V 辐射式和辐射—对流式过热器的校核计算和设计计算.....	(185)
V—1 节 计算的选择.....	(185)
V—2 节 贴墙辐射式过热器的校核计算.....	(185)
V—3 节 屏式过热器的校核计算.....	(186)
V—4 节 小型锅炉的辐射式和辐射—对流式过热器的设计计算.....	(188)
附录 VI 燃料、水和蒸汽的计算特性表.....	(193)
参考文献.....	(203)

第 一 章

设计任务和热力计算原始数据选择

第 1—1 节 热力计算方法及其一般规定

热力计算分设计计算和校核计算。其方法基本类同。差别在于计算目的、若干未知数和完成计算的顺序方面。

设计计算的目的是以指定的蒸发量、蒸汽参数和燃料来拟定新锅炉方案。

对于现有的锅炉，就作校核计算。按照现有结构特性，在指定的负荷和燃料下，确定诸受热面交界处的水温、汽温、空气温度和烟气温度、机组效率、燃料消耗量。从校核计算结果中，可求得为选取辅助设备和完成水动力、烟风阻力和强度计算所必需的原始数据。

本教材叙述锅炉校核热力计算方法及其各个部件的设计计算方法。若任务条件与设计原型锅炉时依据的条件相差不多时，就用不着改变原型锅炉的总布置及其主要节点。在这种情况下，可用校核计算来确定机组在以指定条件工作时的技术指标，且必要时应提出锅炉个别区段的改造措施。对势必要改造的区段进行设计计算，便可确定其改造内容。

在拟定锅炉改造方案时，例如由于增加锅炉蒸发量、改变蒸汽参数或换用另一种燃料时，可能需要改变机组的一连串部件。但是锅炉的主要部份及其总布置照例保持不变。对那些势必变动的部件改造，则要做到尽可能使原型锅炉的主要节点和另件保持不变。在这种情况下，对那些未作变动的

部件要进行校核计算；对一些改造部件，则作设计计算。

课程设计是由锅炉机组热力计算的计算说明书、锅炉布置图和指导教师指定要完成的若干节点图所组成的。计算说明书要用墨水书写在A₁规格（297×210毫米）的纸张上。

说明书开头应写明锅炉的常用技术特性，并阐明循环系统和汽水分离装置。炉膛、过热器、省煤器和空气预热器应按计算先后简洁阐明。

做计算时应按序运算，弄清楚所做各项计算的作用。计算公式一开始先写成通用式，随后把列于公式中所有各数的数值一一代入，在这之后才写入算得的最终结果。

作热力计算时，对于诸如炉内和烟道内的过量空气系数、热有效系数和对流受热面的利用系数等一系列的数，均采用三——四位有效数字近似值。因此不宜为了力求提高精确度而引进五位或六位数字的数，即使以较大数与较小数相加结果得出多位数字的数，也同样是不适宜的。所得到的数应凑成有效整数。

在计算过程中必须写明和分析清楚原始数和答案的单位，仔细考察它们是否与所采用的单位制相符一致。需牢牢记住，任何公式和方程式的左右侧度量单位均应相同，而且进行加减法运算的只能具有相同单位。对原始数和计算出来的数进行单位分析，就有可能觉察出作计算时常犯的许多错误。

空气及烟气的容积和焓、锅炉的热平衡和各区段及烟道的吸热量，都是以1公

斤固体或液体燃料 ($\text{米}^3/\text{公斤}$, 千焦/公斤) 和 1米^3 气体燃料 ($\text{米}^3/\text{米}^3$, 千焦/米³) 来计量的。在这种情况下所采用的气体容积均已换算到标准状态 ($p = 0.1$ 兆帕, $t = 0^\circ\text{C}$)。在确定烟气流速时, 容积计算均已考虑到相应烟道内不同于标准状态的实际压力和温度 [文献20]。

本教材所用各数的符号与文献32基本相符。以 1公斤 (1米^3) 工质 (水、蒸汽、空气) 计量的容积、焓、比热、发热值等均用小写字母表示; 以 1公斤 (1米^3) 燃料计量者, 则均用大写字母表示。例如, 1公斤 蒸汽或水的焓—— i 千焦/公斤; 1米^3 空气焓—— i 千焦/米³; 以 1公斤 (1米^3) 燃料计量的空气或燃烧产物焓—— I 千焦/公斤 (千焦/米³); 所求受热面的吸热量—— Q 千焦/公斤 (千焦/米³)。加热载体 (即燃料的燃烧产物) 的温度用 θ 表示, 被加热载体 (水、蒸汽、空气) 的温度, 则用 $t^\circ\text{C}$ 表示。

下标照例放在主符号右下侧。例如, 过热器烟道内的烟焓 I_{ne} 、空气焓 I_B 、燃烧产物容积 V_r 。上标只在下列情况中才采用:

(1) 凡牵涉到燃料质量的一些数, 例如, 工作质燃料中的含碳量、含氢量、含氮量—— C^P 、 H^P 、 N^P ;

(2) 表示理论值 (上标放 $\langle 0 \rangle$) 的一些数, 例如, 理论上所需空气容积为 V^0 ;

(3) 要标明所求区段的进口或其出口的某一数时, 可分别在主符号上侧放上一撇或二撇。例如, 过热器烟道进口处的烟温为 θ'_{ne} , 其出口处为 θ''_{ne} 。

当计算范围未超出所述及的机组部件时, 就不必放上指明该部件的下标。

如果过热器、省煤器和空气预热器在复杂连接方案情况中被划分成若干部分 (若干级), 则应按被加热介质 (蒸汽、水、空气) 的流程, 用罗马字母把计算的若干级和区段进行编号。例如, 第一级省煤器出口水焓用

$i'_{\text{ок}}$ 。

为表明诸数的差值, 在它们主符号左放上希腊字母 Δ 。例如, 烟道内过量空气系数的变化用 $\Delta\alpha$; 温压用 Δt 。

第 1—2 节 计算的任务

为了对指定型式的锅炉进行校核计算或校核—设计计算, 必需有下列资料和原始数据:

- (1) 锅炉的规格 (系列名称);
- (2) 机组蒸发量 D , 吨/时
(公斤/秒)*;
- (3) 以机组蒸发量百分率计量的连续排污量 p , %;
- (4) 主汽阀处的蒸汽压力 p_n , 兆帕;
- (5) 过热蒸汽温度 $t_{n,n}$, $^\circ\text{C}$;
- (6) 省煤器前的给水温度 $t_{n,n}$, $^\circ\text{C}$;
- (7) 燃料种类及其主要特性;
- (8) 燃料的燃烧方法和炉膛型式;
- (9) 尾部受热面型式及其布置;
- (10) 排烟温度 θ_{yx} , $^\circ\text{C}$;
- (11) 空气预热器进口处的空气温度 $t'_{\text{вн}}$, $^\circ\text{C}$ 及其出口处的空气温度 $t''_{\text{вн}}$, $^\circ\text{C}$ 。

(1) — (7) 项的原始数据总是可从设计任务中得知的, 而 (8) — (10) 的数据则可能未必会指明。在这种情况下这些数据可自行采用。计算时所必需的机组及其部件的结构特性, 可从指定的蒸汽锅炉以及从指定的或自行采用的燃烧设备、省煤器、空气预热器的图纸和技术条件中选取。

第 1—3 节 炉膛型式选择

如果原型的或现有的锅炉炉膛不能满足设计任务诸项条件时, 就得进行炉膛型式选择。在中小容量锅炉机组内, 可采用层燃炉

(1) (注) 在换算到国际制的度量单位时, 宜以兆瓦表示的热功率来说明锅炉特性 (文献18)。

和室烧炉。

层燃炉操作简单，能稳定工作的负荷范围较大，其设备成本和操作费用要比室烧炉低。层燃炉宜在燃用筛分煤和可燃质挥发物 $V_r \geq 20\%$ 及 0—6 毫米的碎末含量不超过 60% 的原煤、筛选过的无烟煤和半无烟煤、块状泥煤、油页岩和各种废木料时使用于蒸

发量 $D \leq 35$ 吨/时的机组中〔文献32〕。

不推荐把层燃炉用来燃烧无烟煤屑、无烟原煤、贫烟煤以及 $W^a \geq 3.4$ 的高水份褐煤、切铲泥煤和选煤后的下脚煤，因为无法保证层燃炉能可靠和经济地烧尽这些燃料。

表1—1中推荐的层燃炉型式，可按燃用的燃料种类和机组蒸发量选用。

表1—1

推荐使用的层燃炉型式

燃料种类	机组蒸发量D, 吨/时		
	2.5—4	6.5	10—35
果仁块和小块状的无烟煤(AC和AM)	有风力机械抛煤机和翻转炉篦排的层燃炉 (ПМЗ—ППК 型)①	有正行程链条炉排的自落式进煤层燃炉	
烟煤和褐煤		有风力机械抛煤机和反行程链条炉排的层燃炉	
		ПМЗ—ППК型炉膛	有风力机械抛煤机和正行程链条炉排的层燃炉
块状泥煤	有倾斜炉篦排的井式炉		井式链条炉

①(注) 在蒸发量 $D < 2$ 吨/时的机组中采用翻转炉篦排 (ППК型) 和手饲燃料的层燃炉

室烧炉在燃用液体和气体燃料时可使用于任何蒸发量的机组中，但在燃用煤粉燃料时，就只用于蒸发量 $D \geq 25$ 吨/时的机组

中。

选用室烧炉型式时可按所燃用的燃料种类和机组的蒸发量使用表1—2〔文献32〕。

表1—2

固体燃料室烧炉的推荐型式

燃料种类	机组蒸发量 D , 吨/时	炉膛型式和磨煤方式
无烟煤和贫煤	≥ 50	使用筒式球磨机来磨煤的固态排渣或液态排渣煤粉炉
挥发物 $V_r < 25\%$ 的烟煤	≥ 50	使用筒式球磨机或中速球磨机来磨煤的固态排渣煤粉炉
$V_r \geq 25\%$ 的烟煤	≥ 25	使用中速或高速(锤击式)磨煤机来磨煤的固态排渣煤粉炉
褐煤	≥ 25	竖井磨煤炉或风扇式磨煤机的固态排渣炉
切铲泥煤	2.5—25	苏联 ИКТН (中央汽锅所) 赛尔什涅夫型风力室烧炉
切铲泥煤	≥ 25	竖井磨煤机的固态排渣炉

第1—4节 尾部受热面的预选; 排烟温度和空气温度

蒸发量 $D < 10$ 吨/时的机组在锅炉制造厂供货时是不带尾部受热面的。尾部受热面的型式及其布置是在拟定锅炉设置方案时确定的。

根据文献[35], 所有蒸发量 $D \geq 2.5$ 吨/时的机组在蒸发管束后面烟温大于 250°C 的情况下都应具有尾部受热面——省煤器和空气预热器。

在小容量机组中既可采用由省煤器和空气预热器组成的联合式尾部受热面, 也可采用只装一个省煤器或一个空气预热器。在蒸发量 $D < 10$ 吨/时的机组中不宜装置联合式尾部受热面, 因为要把它们与小型锅炉布置在一起是很困难的, 而且设置这些尾部受热面, 将提高投资费, 并使机组操作复杂化。因此, 这些锅炉一般只有一种尾部受热面——省煤器或空气预热器。空气预热器是在燃用的燃料为高水份褐煤(牌号B1)、切铲泥煤和各种废木料时, 为使燃烧过程强化和具有稳定性以及为了提高炉膛效率而必需预热空气时才予设置的。

省煤器采用BTH(全苏热工研究所)型的铸铁肋片式和光滑钢管式(沸腾型和非沸腾型), 或采用下面部分(《冷端》)为铸铁肋片管和上面部分为钢管的联合式。锅炉监督规程只允许锅炉在其锅筒压力 $P_B \leq 2.2$ 兆帕时方可采用铸铁省煤器。铸铁省煤器简单和操作可靠, 其内外两侧的抗腐

蚀性要比钢管的强。

钢管式省煤器在蒸发量 $D < 10$ 吨/时的机组中是很少采用的。钢管式省煤器可以使用于燃用煤气且其进口水温 $\geq 100^\circ\text{C}$ 的锅炉中, 或者, 如果按计算结果需要装设沸腾型省煤器的时候, 可作为第二级(按水的流程)省煤器来使用。

排烟温度和空气预热温度应当与指定的燃料种类, 谋求的炉膛型式、锅炉尾部受热面型式及其布置协调一致。

在选择排烟温度时, 应考虑到排烟中所含有的水蒸汽凝聚于低温受热面上产生腐蚀的可能性。低温受热面上的水份生成速度及其腐蚀均取决于燃料中的含水量和含硫量。因此在燃用高水份或高硫份燃料时, 排烟温度要选取得更高些。对于有尾部受热面的锅炉, 推荐使用的排烟温度已列于表1—3中。蒸发量较小的机组应采用较高的数值。

如果事先规定要设置玻璃管的空气预热器来预先加热空气, 则推荐使用的排烟温度可比表1—3中所列数值低 $20-25^\circ\text{C}$ 。

推荐使用的空气温度已列于表1—4中, 可按炉膛型式、燃料种类和机组蒸发量取用。蒸发量较小的机组应采用较低的数值。

空气预热温度确定了空气预热器和省煤器的布置系统。如果热空气温度对于湿燃料($W^{\text{H}} \geq 3.6$)来说是低于 250°C 和对于干燃料来说是低于 300°C 的话, 则推荐使用单级空气预热。在这种情况下, 整个空气预热器装设在省煤器之前或后, 也即采用串联布置尾部受热面。

表1—3 推荐使用的排烟温度 θ_{pr} , $^\circ\text{C}$

燃料种类	机组的蒸发量 D , 吨/时		
	< 10	$10-20$	> 20
干的固体燃料 ($W^{\text{H}} < 1.5$)	140—160	130—150	120—140
湿的固体燃料 ($W^{\text{H}} = 1.5-5$)	150—170	140—160	130—150
高水份固体燃料 ($W^{\text{H}} > 5$)	160—180	150—170	140—160
重油	160—180	140—160	130—150
天然气	150—170	130—150	120—140

表1—4

推荐的炉膛进风温度 t_B , °C

炉膛型式和燃料种类	机组的蒸发量 D , 吨/时		
	<10	10—20	>20
层 燃 炉			
贫煤和无烟煤	25—30	100—150	150—200
烟煤和牌号为B2及B3的褐煤	25—30	150—200	150—200
牌号为B1的褐煤	100—150	150—200	150—250
泥煤和各种废木料	200—210	200—250	200—250
固态排渣室烧炉			
无烟煤和贫煤	—	—	350—400
低水份烟煤 ($W^a < 1.5$)	—	—	250—300
水份为 $W^a = 1.5 \sim 5$ 的褐煤和烟煤	—	—	300—350
高水份褐煤 ($W^a > 5$)	—	—	350—400
切铲泥煤	200—210	250—300	380—420
液态排渣室烧炉			
燃用各种燃料	—	—	380—420
煤气—重油炉			
天然气和重油	25—30	100—150	200—300
高炉煤气	25—30	150—200	250—300

如果热空气温度高出上述数值, 就要采用两级空气预热。在这种情况下, 把空气预热器分成两部分(两级)——第一部分, 也就是进风级(所谓《冷段》), 和第二部分, 出风级(所谓《热段》)。空气预热器的第一级放置在省煤器后面, 第二级放置在省煤器前面, 或放在两部分(级)省煤器之间。尾部受热面的这种布置方式称为《分插》式。

尾部受热面作《分插》布置时, 对于蒸发管束不够多的锅炉来说, 要采用划分成两部分(级)的省煤器。

在计算具有尾部受热面的蒸汽锅炉时, 热空气温度的选取应根据上述推荐和省煤器及空气预热器的布置特点而定。如果采用单级布置, 那么, 所选取的热空气温度不得超过260—300°C, 而在《分插》布置时——则可超过上列数值。

空气预热器的进风温度 t'_a 一般等于锅

炉房内的空气温度, 也即25—30°C。但是在燃用高水份($W^a > 3.6$)和含硫燃料(例如多硫重油)时, 它们的烟气具有较高露点温度, 在空气预热器的, 为冷空气所冲刷到的若干管子上面, 就有水蒸汽凝结下来, 使金属强烈腐蚀。为预防腐蚀, 在燃用高水份固体燃料时, 应把钢管式空气预热器前面的冷空气预先加热到50—60°C; 在燃用重油时, 加热到80—90°C。

为了事先预加热空气, 有时利用蒸汽暖风器或把部分热风再循环到风机的吸风管口。用蒸汽暖风器热风再循环来预加热空气, 将使锅炉因排烟温度增加而降低其经济性, 所以很少采用。

目前推广在玻璃管的空气预热器中预加热空气。在这种情况下, 空气靠排烟热量来预加热, 结果使排烟温度下降, 而锅炉的经济性就提高了。

在工业锅炉机组中, 为减少硫酸腐蚀,

有时就把空气预热器放在省煤器之前。

第1—5节 绘制锅炉方案图

在着手热力计算前，必须确切搞清楚整套锅炉的总布置和参与换热的若干介质（烟气、水、蒸汽、空气）和流动方向。为此，要绘制锅炉方案图，把锅炉的所有主要部件（炉膛、过热器、省煤器、空气预热器）都标绘在此图上。

对于具有水平烟道的蒸汽锅炉（ ΔKB 型、 ΔKB_p 型、 KE 型、 ΔE 型），方案图绘制成两个投影面（纵剖面和水平剖面），对于其它锅炉——一个投影面（纵剖面）。在方案图上应标明省煤器进口联箱的给水压力、锅筒压力和主蒸汽出口联箱的汽压。

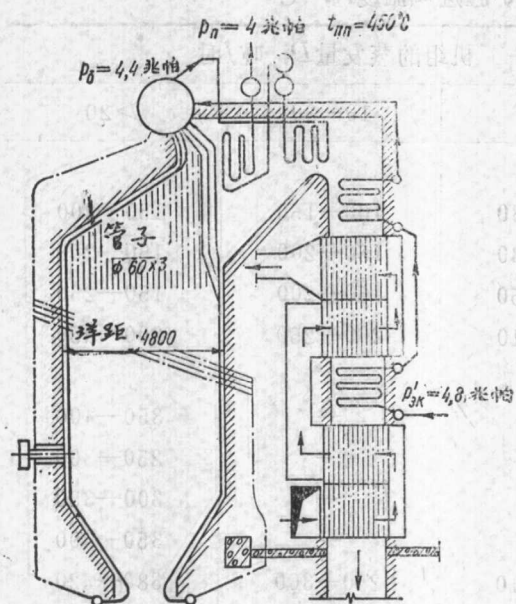


图1-1 TП-35V型蒸汽锅炉方案图

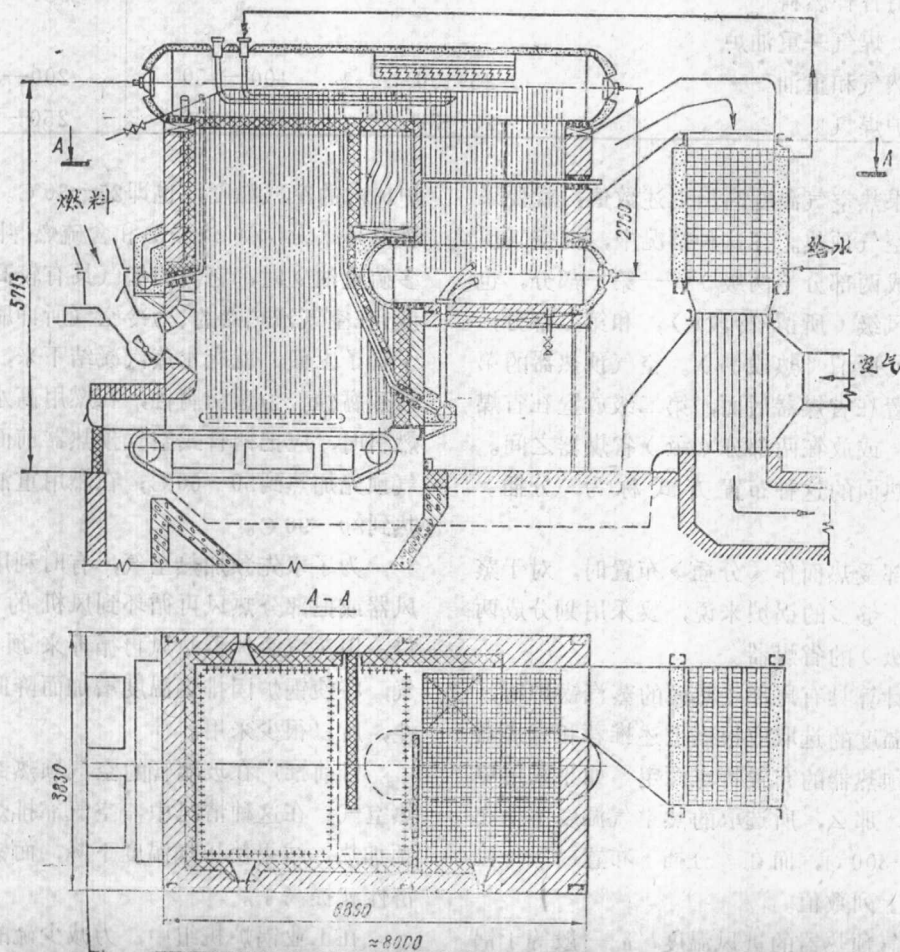


图1-2 ΔKB_p 型蒸汽锅炉方案图

在空气进入钢管式空气预热器之前进行预加热的情况下，例如在使用蒸汽暖风器或玻璃管空气预热器来预加热空气时，应把所采用的预加热方法和预加热器后的空气温度标明于方案图上。

如果缺少有关锅炉汽水管路各段压力的精确数据，则可以大致估定一下压力

值，可假设把省煤器和过热器的水动力阻力各采取为锅筒压力的10%。在这种情况下，锅筒压力 $p_6 \cong 1.1 p_n$ ，而省煤器进口联箱压力 $p'_{\text{ок}} \cong 1.1 p_6$ ，式中 p_n ——设计任务中指定的出口联箱主汽压力。

在图1—1和1—2中列出 $TII-35\gamma$ 型和 $IIKB_p$ 型蒸汽锅炉方案图的实例。

第二章 燃料、空气和燃烧产物

第2—1节 按任务指定的 W^p 和 A^p 值来换算燃料成分及其发热值

在附录Ⅵ中列出苏联各主要固体燃料、液体燃料和气体燃料的计算特性。切勿把表内列出的各项数值看作为强行规定的和一成不变的标准值。这只是燃料在其成分和质量随同地点、时间和开采方法而变时的某些平均定性值。固体燃料和重油内的含水量不仅取决于燃料产地、种类和品级，而且还取决于储运方式、季节、气候条件、卸重油时的加热方法以及其它诸因素，因此它们的含水量就可能有重大变化。同样，固体燃料的灰份也取决于一系列因素，诸如燃料开采和加工方法（筛分和选矿）、贮藏方法和存放期等。

在许多场合下，固体燃料和重油内的含水重和含灰量与表内平均值可能相差很大。因此在某些情况下，要把取自表内的固体燃料和液体燃料之计算特性换算到任务指定的不同于表值含水量和表值含灰量的数值。把燃料工作质从表值含水量 W^p 表值和表值含灰

量 A^p 表值下的表值元素成分换算成任务指定的 W^p 和 A^p 值下的工作质，可按式进行：

$$C^p = C^p_{\text{表值}} \frac{100 - W^p - A^p}{100 - W^p_{\text{表值}} - A^p_{\text{表值}}}, \quad (2-1)$$

$$H^p = H^p_{\text{表值}} \frac{100 - W^p - A^p}{100 - W^p_{\text{表值}} - A^p_{\text{表值}}}, \quad (2-2)$$

.....
余类同。

把元素成分的所有计算分量总和起来，以此来校核燃料成分换算的正确性。允许的误差值不得超出0.5%。

燃料的折算特性 A^n 、 W^n （%公斤/兆焦）按下式确定：

$$(1) \text{ 折算灰份 } A^n = 10^3 A^p / Q^n_H, \quad (2-3)$$

$$(2) \text{ 折算水份 } W^n = 10^3 W^p / Q^n_H. \quad (2-4)$$

把表值低发热值（千焦/公斤或千焦/米³）换算成任务指定值 W^p 和 A^p 的工作质发热值时所使用的公式如下：

$$Q^n_H = (Q^p_{H \text{ 表值}} + 25W^p_{\text{表值}}) \times \frac{100 - W^p - A^p}{100 - W^p_{\text{表值}} - A^p_{\text{表值}}} - 25W^p. \quad (2-5)$$

*（注）在燃料的计算特性表（表Ⅵ—1和Ⅵ—2）中，发热值以兆焦/公斤（兆焦/米³）计量。

在燃用其质量份额分别为 g' 和 g'' 的两种固体或液体燃料的混合燃料时，每 1 公斤混合燃料的发热值（千焦/公斤）可按下式计算：

$$Q_H^p = Q_H^{p'} g' + Q_H^{p''} g'' \quad (2-6)$$

在燃用固体燃料或液体燃料与气体燃料的混合物时，计算可按 1 公斤固体或液体燃料进行，並要计入耗用 1 公斤燃料的气体燃料量 x （米³）。在这种情况下混合燃料的假想发热值（千焦/公斤）按下式确定：

$$Q_H^p = Q_H^{p'} + x Q_H^{p''} \quad (2-7)$$

式中 $Q_H^{p'}$ 和 $Q_H^{p''}$ ——分别为固体或液体燃

料的低发热值（千焦/公斤）与气体燃料的低发热值（千焦/米³）。

第 2—2 节 过量空气系数和锅炉烟道内诸漏风系数的选择

在作热力计算时，炉膛出口处的过量空气系数 α''_T 和蒸汽锅炉各个部件中的漏风系数是根据机组运行时综合求得的数据取得的，已分别列于表 2—1、表 2—2 和表 4—1～4—5 内〔文献 32〕。

在蒸汽锅炉各段烟道截面处的过量空气

表 2—1 煤粉制备系统诸漏风系数的平均值

制粉系统特性	$\Delta \alpha_{\text{漏}}$
筒式球磨机：	
用热风干燥的中间仓储制	0.10
用空气和炉烟混合剂干燥的中间仓储制	0.12
直吹式	0.04
锤击式磨煤机：	
负压工作	0.04
在热风正压下工作	0
负压工作的中速辊式磨煤机	0.04
带预干燥管的风扇式磨煤机	0.2—0.25

系数是以炉膛内的过量空气系数加上位于炉膛与所求截面之间诸段烟道内的漏风系数总和求得之，也即：

$$\alpha = \alpha''_T + \sum \Delta \alpha \quad (2-8)$$

式中 α ——所求部件内的过量空气计算系数；

$\sum \Delta \alpha$ ——位于炉膛与所求烟道截面之间所有各段烟道中的漏风系数总和。

第 2—3 节 空气和燃料燃烧产物的容积计算

空气和燃烧产物的容积及焓的确定是按 1 公斤固体或液体燃料、或者按 1 米³ 气体燃料计算的。计算时未把燃料的化学和机械未完全燃烧损失考虑进去。化学未完全燃烧损

失，也即，在进行热力计算时所采用的 q_3 值是很小的，实际上不会影响计算精确性。机械未完全燃烧损失是以计算中引入燃料的计算消耗量 B_F 来考虑的。 $\alpha = 1$ 时的理论上所需空气容积，米³/公斤（米³/米³），可按下式确定：

(1) 对于固体和液体燃料

$$V^0 = 0.0889 (C^F + 0.375 S_{O_{F+X}}^F) + 0.265 H^F - 0.0333 O^F \quad (2-9)$$

(2) 对于气体燃料

$$V^0 = 0.0476 [0.5 CO + 0.5 H_2 + 1.5 H_2 S + \sum (m + 0.25n) C_m H_n - O_2] \quad (2-10)$$

式中 m 和 n ——为燃料成分中烃化学式的碳、氢原子数。

在燃用固体和液体燃料时， $\alpha = 1$ 的燃

表2—2 额定负荷下负压运行锅炉的炉膛内和烟道中的漏风系数

烟气通道的分段	$\Delta\alpha$
炉膛:	
外墙有金属护板的固态排渣煤粉炉	0.07
没有金属护板的固态排渣煤粉炉	0.10
外墙有金属护板的液态排渣煤粉炉和煤气重油炉	0.05
没有金属护板的液态排渣煤粉炉和煤气重油炉	0.08
旋风炉	0.03
机械或半机械化层燃炉	0.10
手烧层燃炉	0.30
烟道:	
凝渣管和屏式过热器	0
第一对流管束	0.05
第二和第三对流管束(对每一管束)	0.10
过热器	0.05
钢管式单级省煤器	0.08
钢管式两级省煤器(对每一级)	0.04
铸铁省煤器,带护板	0.10
铸铁省煤器,未带护板	0.20
钢管式单级空气预热器	0.06
钢管式两级空气预热器(对每一级)	0.03
玻璃管式空气预热器	0.10
板式空气预热器(对每一级)	0.10
再生式空气预热器	0.25
除尘器	0.05
由空气预热器到引风机的烟道:	
钢制烟道,每10米长	0.01
砖砌烟道,每10米长	0.05

烧产物理论容积, 米³/公斤(米³/米³)*,
按下式计算:

(1) 三原子气体的容积

$$V_{RO_2} = 1.866 \frac{C^p + 0.375S_{O_2+g}^p}{100}, \quad (2-11)$$

(2) 双原子气体的容积(等于氮的理论容积)

$$V_{N_2}^0 = 0.79V_H^0 + 0.008N^p, \quad (2-12)$$

(3) 水蒸汽容积

$$V_{H_2O}^0 = 0.111H^p + 0.0124W^p + 0.0116V^0. \quad (2-13)$$

对于燃用气体燃料的情况, 相应的计算式(米³/米³)如下:

$$V_{RO_2} = 0.01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mCmHn), \quad (2-14)$$

$$V_{N_2}^0 = 0.79V^0 + 0.01N_2, \quad (2-15)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0.01(H_2S + H_2 + \sum 0.5n$$

$$CmHn + 0.124d_{r, \tau\lambda}) + 0.0161V^0, \quad (2-16)$$

式中 $d_{r, \tau\lambda}$ ——按1米³干气体计量的燃料含水量(克/米³); 在 $t_{r, \tau\lambda} = 10^\circ\text{C}$ 时, 可算作 $d_{r, \tau\lambda} = 10\text{克/米}^3$ 。

在 $\alpha > 1$ 时的空气容积, 米³/公斤(米³/米³), 将变成:

$$V = \alpha V^0. \quad (2-17)$$

固体、液体和气体燃料的燃烧产物在 $\alpha > 1$ 时的容积是与理论容积相差一个随同过量空气一起进入锅炉的空气容积和水蒸汽容积。

漏入的空气不含三原子气体, 因此这些三原子气体的容积 V_{RO_2} 就与过量空气系数

*〔注〕原文中列有此(米³/米³)的单位式, 但在燃用固体和液体燃料时, 此单位式是用不到的——译者。

无关, 並等于理论值。

双原子气体和水蒸汽容积, 米³/公斤 (米³/米³), 按下式确定:

$$V_{R_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V^0; \quad (2-18)$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0.0161(\alpha - 1)V^0. \quad (2-19)$$

在 $\alpha > 1$ 时烟气总容积, 米³/公斤 (米³/米³), 为

$$V_r = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O}. \quad (2-20)$$

三原子气体的容积份额, 等于诸气体在总压力为0.1兆帕之下的分压力按下式算得:

$$\Gamma_{RO_2} = V_{RO_2} / V_r; \quad (2-21)$$

$$\Gamma_{H_2O} = V_{H_2O} / V_r; \quad (2-22)$$

$$\Gamma_n = \Gamma_{RO_2} + \Gamma_{H_2O}. \quad (2-23)$$

在燃用固体燃料时, 烟气中的灰浓度

(克/米³) 按下式计算:

$$\mu = 10A^p \alpha_{gH} / V_r, \quad (2-24)$$

式中 α_{gH} ——被烟气带走的燃料灰份份额 (其值列于表4-1~4-4)。

确定空气和燃烧产物容积、三原子气体的容积份额和灰份浓度的有关计算已综合于表2-3中。在此表内, 对流受热面各计算区段的编排次序和区段数目应当与所求锅炉内诸受热面的布置一一对应。

对于燃用气体燃料的情况, 相应的计算式 (米³/米³) 如下:

对于具有减温器的、作《分插》布置的过热器来说, 要分两个区段计算: 减温器前面及其后面。在尾部受热面作《分插》布置时, 每级空气预热器和省煤器应单独计算。

表2-3 诸受热面中的燃烧产物特性
($V^0 = \dots$ 米³/公斤; $V_{RO_2} = \dots$ 米³/公斤; $V_{N_2}^0 = \dots$ 米³/公斤; $V_{H_2O} = \dots$ 米³/公斤)

量 名	单 位	炉膛, 凝渣管	各段对流受热面			
烟道内过量空气的计算系数	—					
V_{RO_2}	米 ³ /公斤 (米 ³ /米 ³)					
$V_{R_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V^0$	米 ³ /公斤 (米 ³ /米 ³)					
$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0.0161(\alpha - 1)V^0$	米 ³ /公斤 (米 ³ /米 ³)					
$V_r = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O}$	米 ³ /公斤 (米 ³ /米 ³)					
$\Gamma_{RO_2} = V_{RO_2} / V_r$	—					
$\Gamma_{H_2O} = V_{H_2O} / V_r$	—					
$\Gamma_n = \Gamma_{RO_2} + \Gamma_{H_2O}$	—					
$\mu = 10A^p \alpha_{gH} / V_r$	克/米 ³					
$10^3 A^p \alpha_{gH} / Q_{Hr}^p$	%公斤/兆焦					

计算:

$$I_B = V^0 (Ct)_B; \quad (2-25)$$

$$I_r^0 = V_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 (C\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (C\theta)_{H_2O}, \quad (2-26)$$

式中 $(Ct)_B$ 、 $(C\theta)_{RO_2}$ 、 $(C\theta)_{N_2}$ 、 $(C\theta)_{H_2O}$ ——分别为空气、三原子

第2—4节 空气和燃烧产物的焓

空气和燃烧产物的理论容积焓, 均是以温度为 θ °C (或空气温度为 t °C——译注) 下的1公斤或1米³燃用燃料计量的, 可按下式

气体和水蒸汽的比焓, 千焦/米³。

空气和燃烧产物的比焓已列于表 2—4 中。干三原子气体的比焓 $(C\theta)_{RO_2}$ 算作为相同于二氧化碳的比焓 $(C\theta)_{CO_2}$ 。

确定空气和燃料燃烧产物理论容积焓的有关计算项已综合于表 2—5 中。

在 $\alpha > 1$ 时以 1 公斤或 1 米³ 燃料计量的燃烧产物焓可按下式计算:

$$I_r = I_r^0 + (\alpha - 1) I_B^0. \quad (2-27)$$

如果从炉膛带出飞灰的折算量 $\frac{A^p a_{YH}}{Q_H^p} \times 10^3 > 1.5\%$ 公斤/兆焦时, 则烟气焓中应

补加入按下式确定的灰焓 (千焦/公斤):

$$I_{3H} = (C\theta)_{灰} A^p a_{YH} / 100, \quad (2-28)$$

式中 $(C\theta)_{灰}$ ——灰的比焓, 其值已列于表 2—4 中。

确定在各烟道内不同烟温下的燃料燃烧产物焓的有关计算已综合于表 2—6 中。在此表中已标明烟气通道各区段内焓值计算时的温度变动范围。 I 量附近写出的 ΔI 量是在同一 α 值下两相邻纵行的 I 值相差量。在以线性内插法来确定焓或烟温的计算值时可以利用这些 ΔI 值。

表 2—4

空气、烟气和灰的焓

$\theta, ^\circ\text{C}$	$(ct)_B$	$(C\theta)_{CO_2}$	$(C\theta)_{N_2}$	$(C\theta)_{H_2O}$	$(C\theta)_{灰},$ 千焦/公斤
千焦/米 ³					
30	39				
100	132				81
200	266	169	130	151	169
300	403	357	260	304	264
400	542	559	392	463	360
500	684	772	527	626	458
600	830	996	664	794	561
700	979	1222	804	967	663
800	1130	1461	946	1147	768
900	1281	1704	1093	1335	874
1000	1436	1951	1243	1524	984
1100	1595	2202	1394	1725	1096
1200	1754	2457	1545	1926	1206
1300	1931	2717	1695	2131	1360
1400	2076	2976	1850	2344	1571
1500	2239	3240	2009	2558	1758
1600	2403	3504	2164	2779	1830
1700	2566	3767	2323	3001	2066
1800	2729	4035	2482	3227	2184
1900	2897	4303	2642	3458	2385
2000	3064	4571	2805	3688	2512
2100	3239	4843	2964	3926	2640
2200	3399	5115	3127	4161	2760
		5387	3290	4399	

表2—5

空气和燃料燃烧产物的理论容积焓

温度, ℃	$V^0 = \dots \text{米}^3$	$V_{RO_2} = \dots \text{米}^3$	$V_{N_2}^0 = \dots \text{米}^3$	$V_{H_2O}^0 = \dots \text{米}^3$	$I_r^0 = I_{RO_2} + I_{N_2}^0 + I_{H_2O}^0$
	$I_B^0 = V^0 (C_p)_B$	$I_{RO_2} = V_{RO_2} (C_p)_{RO_2}$	$I_{N_2}^0 = V_{N_2}^0 (C_p)_{N_2}$	$I_{H_2O}^0 = V_{H_2O}^0 (C_p)_{H_2O}$	
30					
100					
200					
300					
400					
500					
600					
700					
800					
900					
1000					
1100					
1200					
1400					
1600					
1800					
2000					
2200					

表2—6 各烟道内的燃烧产物焓, 千焦/公斤 (千焦/米³)

$t, ^\circ\text{C}$	烟气通道的若干区段和过量空气系数														
	I_B^0	I_r^0	$I_{\text{сп}}$	α_r		α_I		α_{II}		α_{III}		α_{n-1}		α_n	
				I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI
100															
200															
300															
400															
500															
600															
700															
800															
900															
1000															
1100															
1200															
1400															
1600															
1800															
2000															
2200															

【附注】1. 烟气通道计算区段的段数应与已定的锅炉方案图相符;

2. n ——烟气通道的最后一个区段;

3. 只要把所标明的 (用划线表示的——译注) 各烟道温度范围内的焓值计算出来就行了。